

第 17 回
国際林業研究機関連合
(IUFRO) 世界大会
論 文 集

1981

第17回国際林業研究機関連合世界大会

組織委員会

京 都

林地斜面の安定における植生の役割*

Robert R. ZIEMER**

ZIEMER, Robert R.: 林地斜面の安定における植生の役割, XVII IUFRO 論, 89~96, 1981

植物は根系によって土層を緊縛し、さらに浸透した土壤水分を減少させることにより林地斜面の安定を助ける。植物の根は土塊を通して基岩の割れ目に固着する。また、根系は土層の弱い部分から強固な部分へ達し、さらに、脆弱な土塊にめぐらされた細根は、長い繊維質の結合物質として土塊をつなぎとめる働きをする。温暖で乾燥した夏をもつ地中海型の気候においては、森林の蒸発散は実質的な土壤水分を減少させ間隙水頭と斜面の質量を低減させる。土壌の間隙水圧は降雨に応じつつ季節的に変化し、しばしば結果的に斜面崩壊を引き起こす役割を果たす。樹木が伐採されると根系は腐りはじめ、土壌と根系による組織は急速に弱くなる。そして、樹木が伐採された後の強度の低下、土壌水分量の増加、あるいはその両方が斜面の安全率をかなり低下させ、適度に大きな降雨とそれに関連した間隙水圧の上昇は斜面崩壊を発生させ得るのである。つまり、林木が伐採された後、山地崩壊の頻度は増加することになる。

1. はじめに

山地崩壊の頻度は、林地斜面から林木が除去された後増加する (CRAFT・ADAMS, 1950; 川口・難波, 1956; BISHOP・STEVENS, 1964; SWANSTON・DYRNESS, 1975; Wv, 1976)。植物は様々な機能によって斜面の安定に関係している。それは、根系による機械的な斜面補強、土壤水分と間隙水圧の軽減、林木の重量による斜面への載荷の増大、根による土壌のこじあげ・くさび作用などである (CRAY, 1970)。はじめの2つの作用は斜面の安定度を増加させ、3つ目の作用は安定度を増加あるいは減少させまた影響しないこともある。そして4つ目の作用は斜面の安定度を減少させる。

土壌物質は林地斜面から溪流へ、主にマリエロージョンによって運搬される。土質力学によれば、マリエロージョンは材料に働くせん断応力が有効せん断強度を越えた時に発生する (SWANSTON, 1974)。そこで、すべり域に沿うせん断応力 (τ) は次のように表わされる。

$$\tau = W \sin \alpha \dots\dots\dots(1)$$

ここで (W) は土の実際の重量であり、(α) はすべり面の傾斜である。そしてせん断強度 (S) は次のように表わされる。

$$S = C + W \cos \alpha \tan \phi \dots\dots\dots(2)$$

ここで (C) は土の有効粘着力、(ϕ) は内部摩擦角である。

成熟した森林の重量によって生じる不飽和の非粘性土におけるせん断応力の増加は、樹木の存在による土のせん断強度の増加と等しくつりあっている (BISHOP・SWANSTON, 1974)。また、潜在的なすべり面にかかる樹木の重量は、それが最も発達した森林であっても、土塊の重量に比べればはるかに小さいものであり、林木が存在することはどんな場合でも、斜面の安定に多少とも効果があるのである (川口ら, 1951; GRAY, 1970; SWANSTON, 1970; O'LOUGHLIN, 1974)。林木の重量が問題になるのは常に、激しい降雨時の粘性土において増加した土壤水分の重量が、せん断応力を増加させるような場合である。

また、毎時80kmの風を受けている樹木によって与えられるせん断応力は、斜面の安定にとって強い影響を

• The role of vegetation in the stability of forested slopes (Proc. XVII IUFRO World Congress, Div. 1, 297~308, 1981)
 • Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, USDA

及ぼすとは考えられない。

2. 根系による土の補強作用

根系は、基岩の割れ目に伸びてアンカー作用により弱い土塊をつなぎとめ、弱層を横切ってより強固な土層に達し、また、脆弱な土塊に細い根をめぐらして長繊維の結合材として働き、斜面の安定を助けるであろう。しかし、深い土層においては、基岩へのアンカー作用は無視することができ、他の2つの作用が卓越する。そして、土壤中に混在する植物の根系による補強作用は土壌の粘着力と共通性があり(遠藤・鶴田, 1969)、植物の根の役割を考慮すると土のせん断強度の式は次のように表わされる。

$$S = (C+r) + W \cos \alpha \tan \phi \dots\dots\dots(3)$$

ここで(r)は根による補強作用であり、外見上は根による粘着力と見なされる。

土塊の強度を高める根の能力は広く知られているところであり、ソビエト連邦における研究では、モスクワ川の堤防から採取されたシナノキ(*Tilia cordata*)の根系により補強された土塊を破壊するのに必要な力の合計が約137tと算出された。このうち130tは根系だけを破壊するために使われ、残りの7tは砂質ローム土の破壊に使われた。この場合、シナノキの根の断面積の合計は、堤防が崩れたと仮定した時の破壊面の面積の0.5%にすぎないのであるが、根を破壊するためには全体の95%の力が必要となるのである(TURMANINA, 1963)。

カナダのプリティッシュコロンビア州において、氷河の作用によってできた粘性土の35°の斜面では、根系が飽和時の土のせん断強度の71%を担っていることが調査された(O'LOUGHLIN, 1972)。また、根を含まない土塊に比べ、根系のある方が土の破断される直前の負荷の大きさは70%も大きかった(BJORKHEMら, 1975)。

林地の土の強度を直接測定するのは困難なことであるが、土の強度における根系の効果を評価するのはさらに困難なことである。日本における研究では、幼齢のカワラハンノキ(*Alnus glutinosa*)の根の重量によって、測定された土の強度に53%の変動があったことが説明された(遠藤・鶴田, 1969)。また、プリティッシュコロンビア州において、氷河の作用によってできた粘性の下層土の上に生育しているアメリカトガサワラ(*Pseudotsuga menziesii*)、アメリカネズコ(*Thuja plicata*)、アメリカツガ(*Tsuga heterophylla*)の、老齢の混合林における土の強度への根の役割が研究され

た(O'LOUGHLIN, 1972)。それによれば、土壌サンプル中の根の重量は、試験された7つの変数のうちで土の強さを最も良く表わしており、測定された土の強度に56%の変動があることを説明できるのである。また、アメリカ合衆国カリフォルニア北部において、海岸の砂質土に生育している成熟した shore pine (*Pinus contorta*)の土と根系の組織の強度が測定された(ZIEMER, 1981)。その結果、生育時の直径が17mm以下の根の乾燥重量が、32の土と植生の組合せのうちで土のせん断強度を最も良く予測することのできる変数であった。

根の強さは根の生育とともに増大し、根のせん断強度の対数は根の直径の対数に比例している(ZIEMER・SWANSTON, 1977)。また、根の強さは種類によっても異なり、例えば、アメリカトガサワラの稚樹の根はアメリカネズコに比べ約10%強いのである(O'LOUGHLIN, 1972)。ヒロハハコヤナギ(*Populus deltoides*)の根は最も強く、シダレカンパ(*Betula pendula*)、ヨーロッパナラ(*Quercus robur*)、シナノキ(*Tilia cordata*)、ドイツウヒ(*Picea abies*)の順で続くのである(TURMANINA, 1965)。ここで、ヒロハハコヤナギの根はドイツウヒよりも約40%強いのである。一般に木本の根は同一直径の草木の根に比べ1.5~3倍の強度があると概算され、ソリチャ(*Ceanothus veltinus*)のようなかん木の根はボンデローザマツ(*Pinus ponderosa*)のような針葉樹に比べ約2倍の強さであった(ZIEMER, 1981)。

土の強度のほとんどを根による結合作用によっているような急斜面においては、斜面安定の問題が発生しやすい。皆伐後、根株が腐朽すると、相対的な根による補強作用(式(3)の r)が低下することを模式的に示した(図-1A)。ここでは、根の補強作用は皆伐後2年で本来の50%が失われ、9年で90%が消失する。また、皆伐後直ちに更新が始まる場合には、根の腐朽と再生は図に示したものより複雑な状況になると考えられる。

根の強度の低下速度は、種類や根の大きさ、腐朽菌の活発さなどにより変化する。巨大な根は腐朽に対して抵抗性を持ち土壤中に数十年間も残るが、小さなものはより急速に腐朽する。例えば、50年前に伐採されたアメリカネズコの直径15cm以上の根がそのままの形で発見されたのに比べ、直径1cmの場合は伐採後5年で引張り強度の約50%を失ったのである。また、アメリカトガサワラの場合は、アメリカネズコに比べ急速に腐朽し、その速度は地理的な位置にもよるが、プリティッシュコロンビア州の海岸地方のもの直径1cm

の根は、伐採後3年で約50%に強度が低下した(O'LOUGHLIN, 1972)。ロッキー山脈においては、同じアメリカトガサワラの直径1cmの根の約50%は1年半で腐り、オレゴン州の海岸地方では1年であった(BURROUGHS・THOMAS, 1977)。さらに、90%の根が腐るのにロッキー山脈のものは12年かかり、オレゴン州のものは5年以下であった。ニュージーランドでは、モンテレーマツ(*Pinus radiata*)の根は急速に腐朽し、直径3cmの根の大部分は伐採後3年でほとんど完全に腐ってしまい、直径5cm以上のものも、その多くは樹皮のさや状のものを残すだけであった(O'LOUGHLIN, 1979)。

木本が伐採跡地に更新してくると、新しい根は徐々に土を補強しはじめる。新しい森林の根系による補強作用が、伐採前の森林のその50%になるには約15年必要であり、伐採跡地の土が伐採の行われなかった林地の土の強度に回復するには26年かかるであろう(図-1 A)。実際の土の強度の回復速度は、腐朽による強度の損失よりも、その他の多くの環境因子の影響で変

化する。厳しい条件のもとでは、根の補強作用の回復はより長期間を必要とするに違いない。カリフォルニア州北部の混交した針葉樹林において、25年前に伐採された地域で算出された根の補強作用は、隣接した伐採されていない地域の約40%しかなかった(ZIEMER, 1980)。ここで、根による土の補強作用の正味の大きさは、残って腐りつつある伐根のそれと更新しつつある森林のそれとの合計である。急速に更新が進んでいる林地では、補強作用は収穫後約9年で最低となり、その大きさは伐採されなかった林地の場合の約18%を越えている(図-1 A)。そして、伐採跡地では新しい樹木の根が発達を続けて、補強作用はその後増加してくる。また、更新が5年間遅れた場合、残った伐根による補強作用の衰退は新しい根系が強度を加えるまで約5年間続くであろう。その時、補強作用は最低に達し、その大きさは更新が迅速な場所に比べてかなり小さい。図示した例においては、更新が5年遅れた場合の補強作用の最低値は伐採後12年で現われ、それは伐採しな

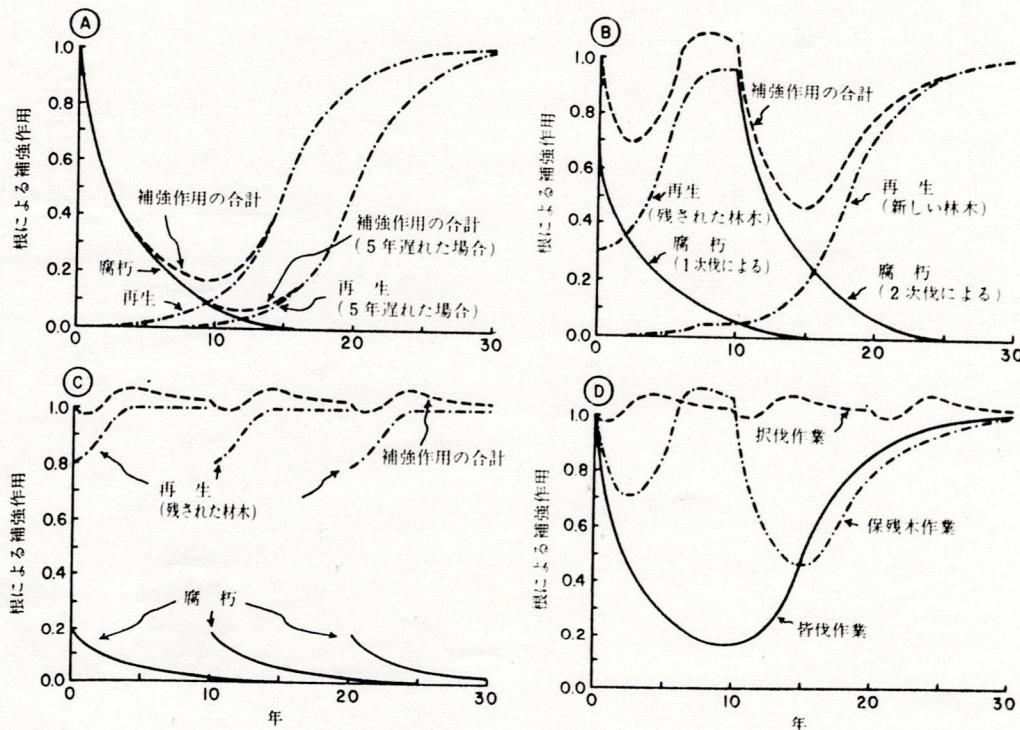


図-1. 皆伐作業(A), 保残木作業(B), 択伐作業(C)毎の、残された根系と新しい根系の腐朽と再生による根の補強作用の変化の概念図。根の補強作用は、腐りつつある根、残された根、新しい根による補強作用の合計である。(D)は3つの作業方法の比較である。

い場合の約7%に過ぎない。

森林に保残木施業が適用され、はじめに林木の70%が、10年後に残りの30%が伐採された場合、いくつかの付加的な強度関係を考慮せねばならない(図-1 B)。70%の伐採による伐根は、皆伐の場合に比例した速度で腐朽すると考えられる。残された30%の林木の根系は、それまで伐採された林木の根系が占めていた土壤に広がり始める。図-1 Bの例においては、根系の拡張は8日目で完成すると仮定されている。生育する余地が存在することは、適度な温度と栄養分が有りさえすれば、はじめの伐採直後にすみやかに実生が成立するために有効である。しかしながら、残された林木の根系と葉が拡張すると、競争が増大して更新した稚樹の生育が沈滞し始める。そして、はじめの伐採から10年後に残った母樹が伐採されると、今度はこれらの根系が腐朽し始める。その結果、稚樹は解放されて再び正常な生育をはじめ。根の補強作用は、(1)1次の伐採による根の腐朽、(2)根系の拡張とその後の残った伐根の腐朽、(3)新しい稚樹による根系の拡張、以上の3つの作用の合計である。伐根の腐朽速度が残った林木の根系の生長速度より遅い場合、伐区での補強効果は非伐区に比べてしばらくの間大きくなるのであろう。図-1 Bの例では、補強作用は最初の伐採の2年後に非伐の場合の70%に低下し、さらに伐採後7年では伐採しない場合よりも10%増大する。最初の伐採から10年後に、残っていた林木は伐採され、15年後に補強作用は最小となり、その時の補強作用の大きさは非伐の場合の約50%である。ちなみに皆伐の場合の補強作用の最小値は非伐の場合の20%で、それは伐採後9年である(図-1 A)。

択伐施業が適用され、20%ずつの林木が10年毎に伐採されると、根の補強作用は図-1 Cに示したようになると予想される。それぞれの伐採によって生ずる伐根は、前の例に比例した速度で腐朽すると考えられる。残った80%の林木の根系は、樹木どうしの空間が軽度の伐採により多少広がるので、相対的に急速に土壤を占拠すると思われる。逆に、復旧速度が腐朽速度を上回ると、補強作用の合計は増加することになる。図の例では、補強作用は伐採後のはじめの2年で3%減少し、その後非伐地に比べ7%増加する。そして、根の腐朽が進むにつれ補強作用は次第に低下してゆく。このパターンは以後続く伐採により繰り返される。

工学的な安定解析が、根系が有る場合と無い場合の斜面に応用された(Wuら, 1979)。安全率(セン断応力に対する有効セン断強度の割合と定義される。)が斜

面の相対的な安定度の指標として与えられ、それが1.0以下の斜面は安定せず崩壊を起こすことになるのである。

(3)式中の相対的な根の補強作用 r を除くすべての因子が一定に保たれる場合を考慮し、補強作用が伐採されていない林地の15%に低下した時の安全率を1.0と仮定する。更新が伐採後迅速に行われた場合は補強作用が常に0.18以上あり、斜面が崩壊を起こすことはないであろう(図-1 D)。しかしながら、更新が5年遅れたとすると(図-1 A)補強作用は伐採後8年から16年にかけて0.15以下に低下し、斜面は伐採後8年で崩壊するであろう。また、補強作用が非伐の場合の60%に低下した時の安全率を1.0とすると、急速に更新が進んだとしても皆伐地は伐採後2~16年の間不安定であり、更新が遅れた皆伐地では伐採後2~21年、保残木施業が行なわれている伐区でも12~17年の間である。しかし、択伐施業下の地域だけは、根の補強作用の低下に起因する斜面崩壊を起こさないであろう。

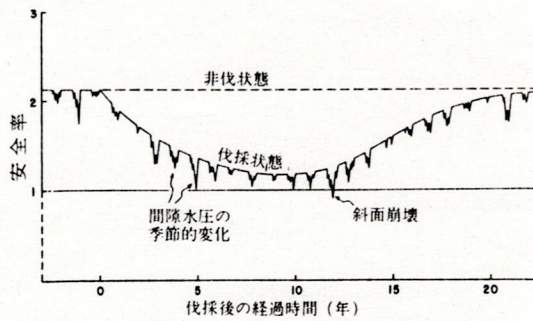
実際に図-1に示したような曲線を推定するには、いくつかの未知の因子を評価せねばならない。それらの因子は、土の強度に関して、異なった種類、大きさ、分布を持つ生きた根系の影響を含んでいるのである。つまり、伐採に引き続く土の強度の低下速度、新しい林が更新されたことによる強度の回復速度、あるいはそれまであった根系が部分的な伐採後拡張することによる強度の回復速度である。また、他の重要な斜面安定において考慮すべき因子は、根の補強作用の影響をそこなうかも知れない。

3. 土 壤 水 分

大規模な降雨と崩壊の発生との間には、緊密な相関関係がある。一般的に、過剰な地下水は斜面崩壊の主要な因子であると認められている。飽和した土壤中の水頭によって発生する間隙水圧は、セン断強度を減少させる。また、間隙水圧の上昇は、揚力を発生させることにより土塊の有効な重量を減少させ得る。そこで、間隙水圧(ρ)を考慮して土の強度の式(3)を書きかえると次のように表わされる。

$$S = (C+r) + (W \cos \alpha - \rho) \tan \phi \quad \dots(4)$$

これに関して、活発な間隙水圧が土のセン断強度を60%減少させ得ることが報告されている(SWANSTON, 1969)。また、増加した地下水が浸水作用と溶脱作用により土の粘着力(C)を低減させることも考えられる。安全率の変化に関連して、季節による間隙水圧と根



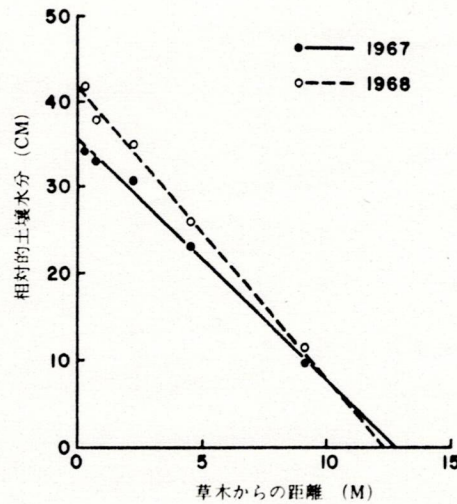
図一 2. 伐採後の根による補強作用の変化と間隙水圧の季節的変動による安全率の変化

の補強作用の消失と回復との間の相互作用は図一 2 のように表現できる。斜面崩壊は季節的な間隙水圧の変化、あるいは根系の補強作用の消失のいずれか一方だけは発生しない。両方の作用が一諸に考慮されるような時、すなわち、伐採に続く根の強度の消失は安全率を低下させ、適当な降雨とそれに関連した間隙水圧の上昇があれば斜面崩壊が発生し得ることになる（この場合、根系による補強作用は最低を過ぎ、増加しつつあるのであるが）。しかし、同じ降雨が数年後に生じても、伐採に起因する斜面崩壊は発生しないであろう。

土壤中を流下する水の摩擦抵抗による抗力に起因する浸透力は、セン断応力の正接成分を土に加えるであろう (SWANSTON, 1974)。斜面に平行な浸透流があり、根系組織のない飽和非粘性の土層の安全率は、同様な土層の浸透流がなく不飽和の場合の約半分である (O'LOUGHLIN, 1974)。

森林は蒸発散により無視できない量の土壤水分を除去することができる。不飽和の土壤中に結果的に発生する負の間隙水圧、または毛細管張力は粒子間の圧力を増加させ、その結果土の強度を高める。アメリカ合衆国カリフォルニア州シェラネバダにおいて、夏期の蒸発散ののちに残った土壤水分の注目すべき状況が、成熟した一本のナガミマツ (*Pinus lambertiana*) の周囲で観察された (ZIEMER, 1978)。それによれば、ほとんどの土壤水分の減少が木の下の 2.4m から 4 m の間と、木の周囲 6 m までで起こっている。木から 12m 以上離れると土壤水分の含有量は深き方向に比較的一様となる。また、地表面からの蒸発は地表から 0.6m までの土層ではっきりと起こっていた。

そして、1年後にこの単木が伐採されたあとで、その周りの土壤水分の減少が測定された(図一 3 C)。木の下 2.4~4.0m の範囲の活発な枯渇域が消え、土壤水



図一 4. 単木からの距離と土壤水分との関係

(2 回の夏の乾期の後に測定)
(ZIEMER, 1978)

分量は 0.6m 以下ではかなり一様になっている。また、木の周囲で土壤水分が減少する様子は、伐採後はもはや明白ではない。

夏の終りには、単木からの距離と相対的な土壤水分量との間に比例関係があった(図一 4)。相対的な土壤水分は、木から 12m から 18m の地域の土壤水分の合計から、半径 12m 以内の土壤水分の合計を差し引いたものである。そして、単木が伐採された後の半径 18m 以内の土壤水分を一様になるように補正してある。立木からの距離が増えると、相対的な水分量は減少する。すなわち、木を除去することによって得た土壤水分の貯えは、立木からの距離が増すにつれて減少する。相対的土壤水分量の曲線の傾きは、湿潤な年に比べ乾燥した年のほうが大きい。つまり、より木に近い所の土壤水分量は、立木の影響の範囲外の土壤水分量に対して、湿った年におけるより乾いた時におけるほうが低いのである。この例におけるそれぞれの曲線の分散 r^2 は 0.99 よりも大きかった。そして、この場合の回帰は、樹木の影響がその基部から 11.6~12.6m の距離まで及んでいることを示している。そして、測定が行われた 2 年間に、この立木は木から 12m 以上の場所に比べ 63.6 から 73.8 m^2 も多くの土壤水分を枯渇させたのである。

この単木に関する研究では、土と植生と水との相互作用を理解するには不十分であった。また、根系の分

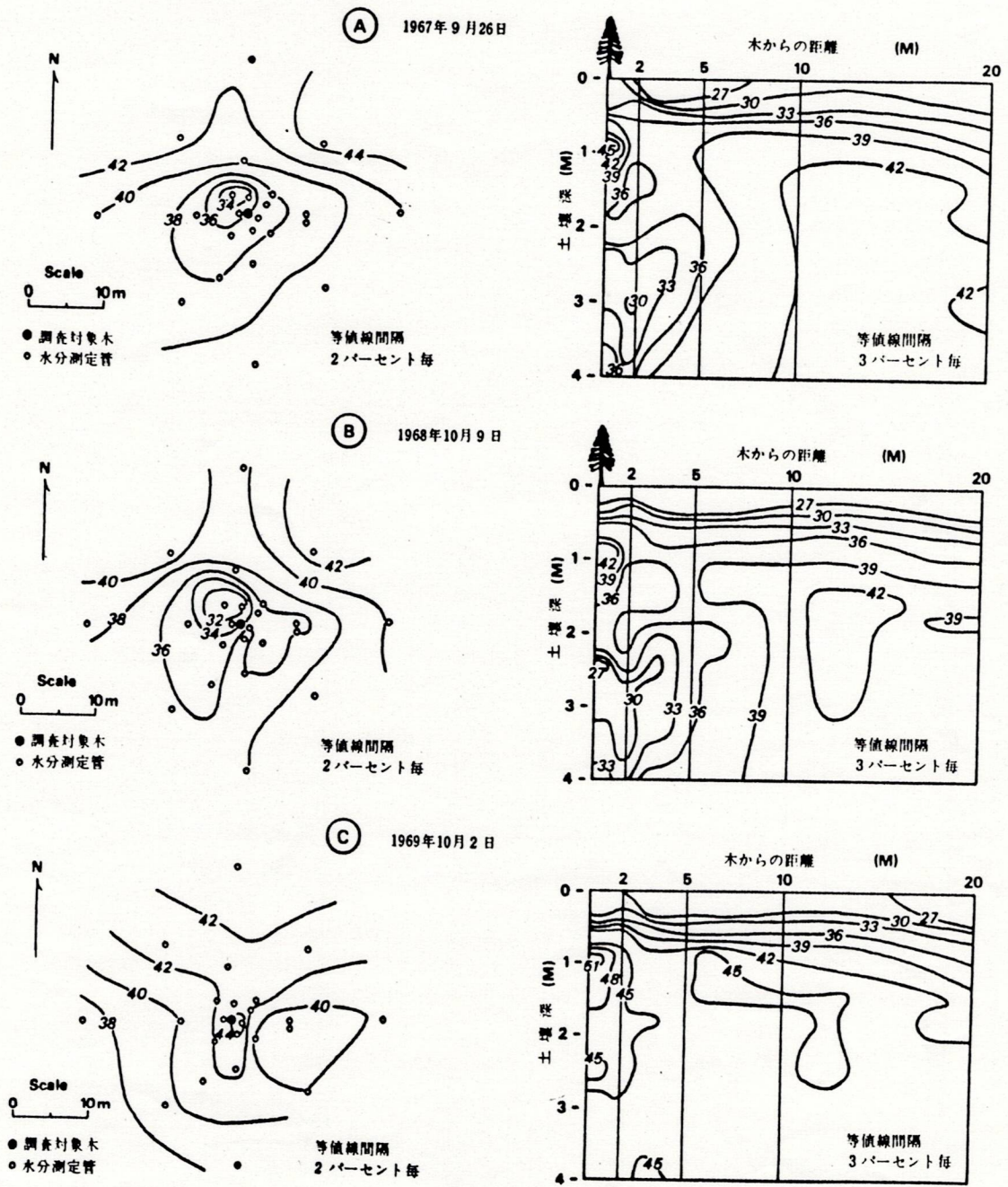


図-3. 単木の周囲と地下4.6mにおける土壌水分(左の図)と単木からの距離と深さによる土壌水分の分布(右の図)。(A), (B)は乾燥した3回の夏の後に測定されたものであり, (C)はその後単木が伐採されたあとの状況である (ZIERER, 1978)

布とその現存量に関する研究は、一様に根が土層の表面付近に集中していることを示している。そして、これらの根の多くは構造上の機能を持ち、その残りが吸収機能を持っているのである。この研究で注目すべきなのは、調査対象木による土壌水分の枯渇が2.4~4.0 mの深さで起こったことである。この深さは根組織の現存量の中心よりもかなり深いのである。これを理解するためには、根の数、現存量、その大きさ、分布と、土壌水分枯渇との相互関係を知ることが必要であり、樹木の大きさと種類によって土壌の枯渇の様子がいかに変化するかということだけでは限られた情報しか得ることができないのである。

山地崩壊の防止において、森林による水分の発散の果たす役割は明らかになっていない。一回の降雨は土壌水分の不足を補い、それによって土壌は飽和されて、毛細管張力によって引き起こされた土粒子間の圧力は消滅する。GRAY (1970) は、極度に飽和した状況ができるまで、林地斜面はかなり大きな降雨に耐え得るとした。また、斜面安定を考慮する際の蒸発散の重要性は、気候と降雨パターンに関係している。単木の研究を例として用い、5 mごとの間隔を持った森林を想定すると、皆伐に等しい状態の地域に比べ、その森林は約30cmも多くの土壌水分を枯渇させることができると考える。また、毎年600mmの降雨しかない乾燥した環境において、林地と伐採跡地との土壌水分の違いを単純におきなうには、全体の半分の降雨が必要となるであろう。しかしながら、降雨が蒸発散をはるかに上回る多雨の地域においては、林地斜面が伐採斜面に比べて乾燥している期間は無視できるほど短い。

新たな森林が更新してくると、伐採作業による土壌水分の違いは急速に小さくなる。一般的に、伐採跡地と林地との間の土壌水分の違いは伐採後1年が最も大きく、しばらくの間は負の指数関数的な速度で回復が継続してゆくのである。また、湿潤な気候においては、伐採された林地とそうでない林地における土壌水分の枯渇状況の違いは、しばしば、伐採後3~5年の間無視することができる (HALLIN, 1967; ZIEMER, 1964)。

4. 結 び

植生は、主に樹木の根により土壌を補強し、あるいは、土壌水分の状況を変えることにより、急傾斜の林地斜面の安定を助けている。また、ほとんどの斜面崩壊は、土壌が飽和するような大きな降雨の間に発生する。そして、土壌中の間隙水圧は、降雨に反応しながら季節的に変化しているのである。森林が伐採された

ばかりの地域では、常に、土壌水分量は伐採されていない地域に比べ大きい。また、伐採に引き続き根系は腐りはじめ、土と根の組織は急激に弱くなる。しかし最終的には、土壌水分の低下と土と根の組織の強度は、新たな樹木からの根系が土壌を占めるようになることによって伐採されなかった森林と同様の状態に回復するであろう。

文 献

- BISHOP, D.M. and STEVENS, M.E., 1964: U.S. Dep. Agric. For. Serv. Res. Paper NOR-1. Juneau, AK, USA.
- BJORKHEM, U., LUNDEBERG, G. and SCHOLANDER, J., 1975: Research Notes no. 22. Departments of Forest Ecology and Forest Soils, Royal College of Forestry, Stockholm, Sweden.
- BURROUGHS, E.R. and THOMAS, B.R., 1977: U.S. Dep. Agric. For. Serv. Res. Paper INT-190. Ogden, UT, USA.
- CROFT, A.R. and ADAMS, J.A., 1950: U.S. Dept. Agric. For. Serv. For. and Range Exp. Sta. Res. Paper 21. Ogden, UT, USA.
- 遠藤泰造・鶴田武雄, 1969: 林業試験場北海道支場年報 (1968)
- GRAY, D.H., 1970: Bull. of the Assoc. of Engineering Geologists, vol. VII, nos. 1 and 2, pp. 45-66.
- HALLIN, W.E., 1967: U.S. Dep. Agric. For. Serv. Res. Note PNW-56. Portland, OR, USA.
- 川口武雄・難波直土, 1956: 林業試験場研究報告第84号, pp.43~66.
- 川口武雄・渡辺降司・滝口喜代志, 1951: 林業試験場研究報告第49号, pp.11~73.
- O'LOUGHLIN, C.L., 1972: Ph.D. dissertation, University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada.
- O'LOUGHLIN, C.L., 1974: Jour. Hydrol. (N.Z.), vol. 13, no. 2, pp. 121-134.
- O'LOUGHLIN, C.L. and WATSON, A., 1979: N.Z. Jour. For. Sci., vol. 9, no. 3, pp. 284-293.
- SWANSON, F.J. and DYRNNESS, C.T., 1975: Geology, vol. 3, no. 7, pp. 393-396.
- SWANSTON, D.N., 1969: U.S. Dep. Agric. For. Serv. Res. Paper PNW-83. Juneau, AK, USA.
- SWANSTON, D.N., 1970: U.S. Dep. Agric. For. Serv. Res. Paper PNW-103. Juneau, AK, USA.
- SWANSTON, D.N., 1974: U.S. Dep. Agric. Gen. Tech. Rept. PNW-21. Portland, OR, USA.
- TURMANINA, V.I., 1963: Moscow Univ. Herald, Scientific Jour., series V, no. 4, pp. 78-80.
- TURMANINA, V.I., 1965: Bull. Moscow Soc. Naturalists, vol. 70, no.5, pp. 36-45.
- WU, T.H., 1976: Ohio State Univ. Geotech. Eng. Rept. 5. Columbus, OH, USA.

- WU, T.H., MCKINNELL, W.P. III and SWANSTON, D.N., 1979: Can. Geotech. Jour., vol. 16, no. 1. pp. 19-33.
- ZIEMER, R.R., 1964: Jour. Geophys. Res., vol. 69, no. 4., pp. 615-620.
- ZIEMER, R.R., 1978: Ph.D. dissertation, Colorado State Univ. Ft. Collins, CO, USA.
- ZIEMER, R.R., 1981: Int. Assoc. Hydrol. Sci. Pub. no. 132, pp. 343-361.
- ZIEMER, R.R. and SWANSTON, D.N., 1977: U.S. Dep. Agric. For. Serv. Res. Note PNW-306. Portland, OR, USA.